

DISTRIBUCION DE LAS VELOCIDADES EXTREMAS DEL VIENTO EN CONFLUENCIA, PROVINCIA DEL NEUQUEN, ARGENTINA

Claudia Palese y Jorge Luis Lassig

Laboratorio de Ingeniería del Viento, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue,
Buenos Aires 1400, 8300, Neuquén, Argentina. E-mails: palese@uncoma.edu.ar, lassig@uncoma.edu.ar

Resumen: El objetivo de este trabajo es calcular el campo de vientos extremos en la zona de Confluencia en la provincia del Neuquén. Se utilizan los métodos de cálculo propuestos en normas internacionales que se basan en el ajuste de la distribución de Gumbel a los vientos extremos y el ajuste de la distribución de Weibull a los vientos medios. Se han generado los mapas de la velocidad de referencia (V_{ref}) y de las velocidades de supervivencia de aerogeneradores (V_{es0} y V_{el}). Estos tienen una resolución espacial en ambas direcciones horizontales de 178 metros. En el área podrían instalarse turbinas eólicas tipo IV y tipo III. Los valores calculados en este trabajo concuerdan razonablemente bien con los propuestos en las normas argentinas.

Palabras clave: energía eólica, vientos extremos, velocidad de referencia, velocidad de supervivencia de aerogeneradores, viento extremo de 10 minutos, viento extremo de 3 segundos

INTRODUCCIÓN

En la zona centro-este de la Provincia del Neuquén (parte del Departamento Confluencia) se ejecuta un proyecto de desarrollo agroforestal y pecuario, que está orientado a convertir el sistema actual de producción basado en la explotación de petróleo y gas. El abastecimiento de agua potable mediante un sistema de riego proyectado a través de un canal que cruzará toda la zona desde el Embalse Mari Menuco hasta la ciudad del Neuquén posibilitará este desarrollo. La conducción principal del canal tendrá una longitud total de 39.400 m.

En la zona se requerirá de un cierto consumo de energía: alimentación de bombas de agua, iluminación de parcelas, energía eléctrica para las familias a instalarse, etc. Esta necesidad energética puede suministrarse desde un parque eólico.

Debido a que la energía eólica depende de la ocurrencia de vientos mientras que las necesidades eléctricas son constantes, no se plantea un consumo directo, es decir, un aerogenerador por chacra, sino una producción energética en la zona a través de un parque eólico, que se interconectaría a la red eléctrica provincial o nacional (que pasan por la zona) cuando el viento lo permita; es decir, consumir energía y devolverla al sistema, dando sustentabilidad al proyecto.

En un estudio previo (Palese, 2009) se caracterizó la densidad de potencia a 30 m de altura sobre el suelo ubicando áreas cercanas al canal de riego con densidad de potencia clase 5 (400 - 480 W/m²), asociadas con velocidades del viento media anual, a 30 m altura, que superan 6,0 m/s. En la zona del canal propiamente dicho la densidad de potencia es clase 3 (240 - 320 W/m²) y las velocidades superan 5,0 m/s. En ese trabajo también se estimó, utilizando la metodología propuesta en Mattio (2003), y como una primera aproximación, el consumo anual de energía eléctrica y la cantidad de aerogeneradores del tipo mediano (hasta 300 kWatt de potencia nominal) necesarios para completar el balance energético eléctrico en el área.

En el diseño de parques eólicos un aspecto importante a estudiar es el régimen de viento tanto para consideraciones de cargas como de seguridad. Los diseñadores analizan el número de veces que pueden ocurrir durante el tiempo de vida útil del sistema grandes cargas y, por lo tanto, grandes reacciones. Se analizan dos aspectos distintos: las condiciones de viento normal, que ocurren frecuentemente durante la operación normal de la turbina eólica; y las condiciones de vientos extremos que se definen con períodos de recurrencia media de 1 y 50 años. Las condiciones extremas incluyen tanto las velocidades más altas (pico) que se dan en las tormentas, como los cambios rápidos que ocurren en la velocidad y dirección del viento.

El objetivo de este trabajo es calcular el campo de vientos extremos (velocidades más altas) y de la velocidad de supervivencia de aerogeneradores, con los modelos propuestos en las normas International Electrotechnical Commission 1400-1 (1994) y en European Wind Turbine Standards II (1998).

VELOCIDAD EXTREMA ANUAL DE PROMEDIOS DE 10 MINUTOS

Se puede adoptar una aproximación teórica al cálculo de vientos extremos utilizando los trabajos de Bergström (1992), Cook (1982) y Harris (1996) que asumen que, dados los estadísticos del viento climático (como la distribución de Weibull o el modelo de turbulencia), se puede calcular la probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos de vientos. Como en esta aproximación “matemática/estadística” los modelos de extremos y de turbulencia están conectados, entonces, los resultados tienen un alcance “físico”.

Para definir las características eólicas del sitio, interesan dos tipos de estadísticas: aquellas que se relacionan con la población total de las velocidades del viento; y las que se relacionan con las propiedades de los extremos.

Para conocer las características generales del viento en un lugar se analizan datos de velocidad del viento promediados cada 10 minutos. Del análisis de este tipo de datos se obtiene la velocidad media de la muestra V_{med} y los parámetros de escala c y de forma k de la función de densidad de probabilidad $f(V)$ de Weibull:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

donde V , c y k son mayores que cero.

La velocidad extrema *velocidad de referencia* V_{ref} se define como la velocidad del viento promediada cada 10 minutos extrema anual, a la altura del cubo de la turbina, que tiene un periodo de retorno de 50 años. Es la velocidad del viento extrema anual a la altura del cubo con un límite de confianza de 98%.

En la norma IEC 1400-1 la proporción V_{ref} / V_{med} es constante e igual a 5 para aerogeneradores clase I a IV. Esa relación se basa en valores típicos encontrados en los códigos de edificación británico y holandés, y probablemente sea una característica de latitudes medias. Este valor resulta de un análisis del tipo Gumbel de mediciones de velocidad del viento de periodos prolongados (más de 20 años). En los estudios de prospección eólica que se realizan previo a la instalación de un parque eólico no pueden esperar décadas de datos de vientos del lugar, no es rentable, así que se toman mediciones anemométricas en el sitio durante un año.

Tomando la función de densidad acumulada $F(V)$ de la distribución de Weibull, la distribución de las velocidades, promediadas cada 10 minutos, extremas anuales está dada por la distribución estadística de orden enésimo:

$$F^n(V) = \left[1 - \exp \left\{ - \left[\frac{V}{V_{med}} \Gamma(1 + 1/k) \right]^k \right\} \right]^n \quad (2)$$

Si V_r es la velocidad del viento promediada cada 10 minutos extrema anual, con un periodo de retorno de T_r años, entonces, se tiene la siguiente relación:

$$T_r = \frac{1}{1 - F^n(V_r)} = T_r \Rightarrow F(V_r) = \exp \left[\frac{(\ln(1 - 1/T_r))}{n} \right] \quad (3)$$

Combinando (2) y (3) encontramos, después de una simplificación algebraica:

$$\frac{V_r}{V_{med}} = \frac{1}{\Gamma(1 + 1/k)} \left[-\ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{\ln(1 - 1/T_r)}{n} \right] \right\} \right]^{1/k} \quad (4)$$

La distribución Fisher-Tippet tipo I o de Gumbel de la velocidad del viento, de datos promedio de 10 minutos, extrema anual, cuando el patrón de vientos del lugar se ajusta a una distribución de Weibull, es:

$$F_n(V) = \exp \{ - \exp [- \alpha (V - \beta)] \} \quad (5)$$

donde $\alpha = k/c$, $(\ln n)^{1-(1/k)}$, $\beta = c (\ln n)^{1/k}$, y $c = V_{med} / \Gamma(1 + 1/k)$. Para un periodo de retorno de T_r años es:

$$T_r = \frac{1}{1 - F_n(V_r)} = T_r \Rightarrow F_n(V_r) = 1 - \frac{1}{T_r} \quad (6)$$

Combinando (5) y (6) se tiene:

$$\frac{V_r}{V_{med}} = \frac{(\ln n)^{1/k-1}}{k \Gamma(1 + 1/k)} \left\{ k \ln n - \ln \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T_r} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

En las expresiones (4) y (7) la relación de V_r a V_{med} es función del parámetro de forma k de Weibull, del número de eventos independientes n y del periodo del retorno T_r . Cuando se grafican V_r / V_{med} en función del parámetro k con las curvas dadas por (4) y (7) ambas casi coinciden.

La teoría del valor extremo sólo trata de extremos de muestras de n observaciones independiente e idénticamente distribuidas que se originan de una población a la que se le ajusta una función de distribución acumulada $F(x)$. Entonces el valor más grande tiene una distribución de probabilidad dada por $F^n(x)$. En el caso de velocidades del viento, promedios de 10 minutos, si los valores promedio de cada diez minutos fueran estadísticamente independientes de aquellos de diez minutos vecinos, entonces se esperaría que el valor más grande anual de la velocidad del viento, de promedios de 10 minutos, tuviera una distribución de probabilidad dada por $[F(x)]^{52596}$, donde $F(x)$ es la distribución de Weibull, y 52596 es la cantidad de datos de diez minutos en un año. Esto no se observa en la práctica, porque los valores de diez minutos adyacentes no son independientes. Castillo (1988) ha mostrado que los datos son estadísticamente estacionarios, y por lo tanto tienen un tiempo de correlación finito, τ , entonces la distribución del valor más grande está dada por $F^n(x)$, donde $n \sim T/\tau$, si T es la longitud del registro (Harris, 1996).

Bergström (1992), usa la función de autocorrelación $\rho(\tau)$ para determinar τ , donde τ es el lapso de tiempo con el cual se calcula la correlación. El número de observaciones independientes, promediado sobre un período de longitud T , dentro de un período de tiempo T_p (longitud de la muestra, generalmente 1 año), puede estimarse de la relación $n = v_T \cdot T_p$. Para determinar el número n de eventos independientes para un año, se usa la frecuencia efectiva v_T dado por Bergström (1992), que para T de 10 minutos (600 segundos) es $v_T = 7,3 \cdot 10^{-4}$; $T_p = 3,15576 \cdot 10^7$; entonces n según (8) es 23037.

El sector utilizado abarca desde 38,50° S a 39,05° S y desde 68,75° W a 68,00° W (Figura 1), que corresponde a una malla de 336 nodos en x y 319 nodos en y , que representa una superficie de 60 km x 56 km (3.360 km²). La resolución espacial horizontal es de 178 m. Para realizar el mapa de la V_{ref} se necesita, según (4) o (7), la confección de los mapas de la V_{med} que se muestra en la Figura 2 (Palese, 2009) y del parámetro de forma k de Weibull (Figura 3). Se utilizó el modelo ArgentinaMap y datos de dirección y velocidad del viento de las estaciones de medición mencionadas en la Tabla I. En la Tabla II se muestran medidas estadísticas descriptivas de los datos de velocidad del viento a la altura de los sensores.

	ESTACIÓN	ALTURA ANEM.	LATITUD	LONGITUD	ALTURA snmm	PERIODO	INTERV MEDICION	FUENTE
1	Neuquén Aero	10 m	S 38° 57'	W 68° 08'	271 m	01/01/1995 a 31/12/2004	1 hora	SMN
2	Capex -Agua del Cajón-	2,5 m	S 38° 56'	W 68° 21'	307 m	30/10/2000 a 26/07/2004	15 min**	CAPEX
3	Mari Menuco	4 m	S 38° 32'	W 68° 33'	416 m	03/07/1996 a 30/06/1997	15 min	LISAMET

Tabla I: Ubicación de las estaciones de medición de viento de superficie. SMN: Servicio Meteorológico Nacional; LISAMET: Laboratorio de Imágenes Satelitales Meteorológicas (UNComahue); CAPEX: Central Térmica Capex. *Con periodos faltantes ver texto. **A partir Febrero/2003 cada 30 minutos.

		V (m/s)	S (m/s)	Vx (m/s)	% calma	k	c (m/s)
1	Neuquén Aero	3,1	2,5	25,3	9,4	1,9	3,4
2	Ag.del Cajón –Capex	3,8	2,8	19,7	2,6	1,8	4,1
3	Mari Menuco	3,7	3,1	21,9	10,2	1,7	4,3

Tabla II: Velocidad media del viento (V), desviación estándar (S), velocidad máxima (Vx), porcentaje de calmas y parámetros de forma (k) y de escala (c) de la distribución de Weibull, a la altura de medición.

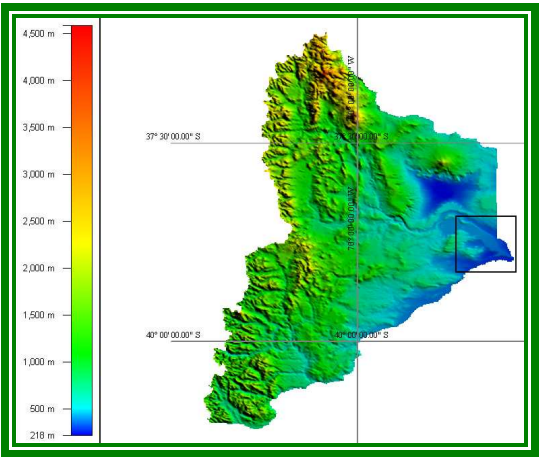


Figura 1: Relieve de la provincia del Neuquén en el que se ha recuadrado la zona en estudio. Las alturas sobre el nivel del mar están dadas en metros.

El campo de la velocidad media del viento a 30 metros de altura sobre el suelo fue calculado a un nivel que sobrepasa la altura media de los árboles más altos, que se utilizan en la región como cortinas rompevientos. Las velocidades calculadas son mayores que 3,9 m/s y menores que 6,8 m/s. El mayor porcentaje del área estudiada tiene velocidades entre 5,0 m/s y 6,0

m/s. Los máximos se ubican en las zonas donde la altura excede 600 metros snmm. La velocidad media del viento, teniendo en cuenta todas las direcciones, es adecuadamente modelada puesto que se observan diferencias de 0,1 m/s en valor absoluto, entre el valor modelado y el observado.

Para los sitios en terrenos planos en latitudes medias el valor del parámetro k de Weibull (para velocidades promedios de 10 minutos) varía típicamente entre 1,65 en áreas continentales, 1,9 en áreas costeras y 2,1 en el mar.

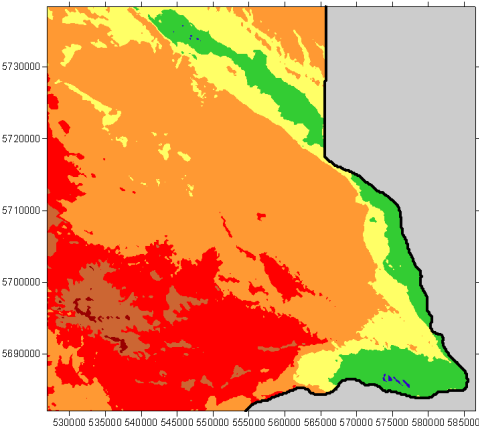


Figura 2: Velocidad media del viento (en m/s) a 30 metros de altura (Palese, 2009).

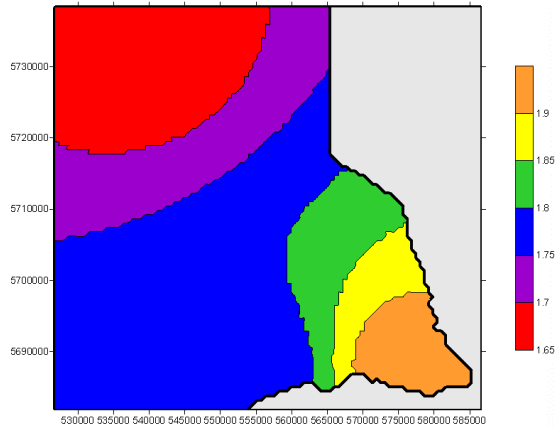


Figura 3: Parámetro de forma k de la distribución de Weibull (adimensional) a 30 metros de altura.

La V_{ref} estimada con la expresión (7) se muestra en la Figura 4 que ha sido calculada teniendo en cuenta los estadísticos de las mediciones de la velocidad del viento del período disponible, a la altura promedio de los cubos de aerogeneradores medianos que es de 30 metros aproximadamente. Las velocidades de referencias en la zona estudiada tienen un rango de valores entre 19,9 m/s y 37,6 m/s. En el área donde está la traza del canal de riego las velocidades son inferiores a 30 m/s, que indica que podrían instalarse turbinas eólicas tipo IV (Tabla III). En la zona donde las velocidades son mayores (Co. Senillosa al sudoeste) la V_{ref} tiene valores que superan 33 m/s, por lo tanto, según las normas IEC 1400-1 podrían instalarse turbinas tipo III (Tabla III).

Clases	I	II	III	IV
V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	30
V_{med} (m/s)	10	8,5	7,5	6

Tabla III: velocidad media y de referencia de las cuatro clases de turbinas eólicas definidas en la norma IEC 1400-1 (1994).

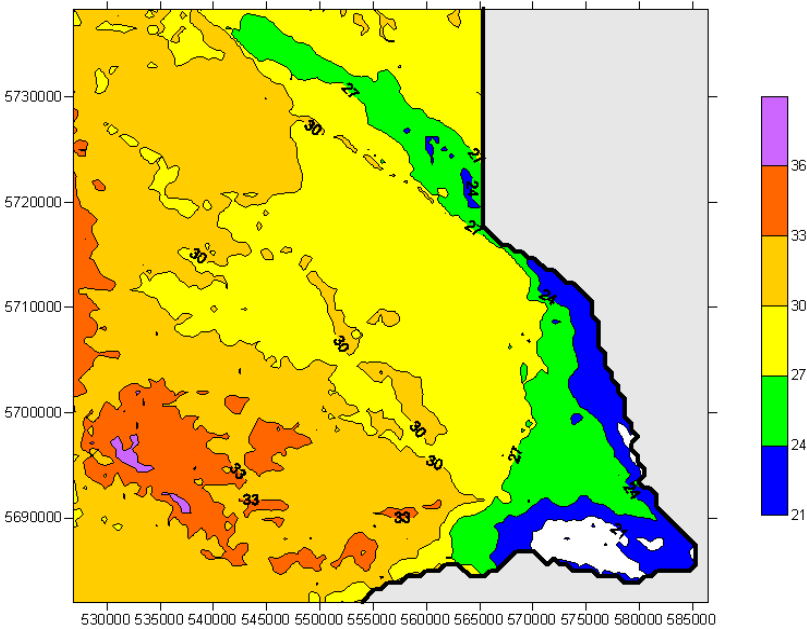


Figura 4: Velocidad de referencia o velocidad extrema anual, que surge de mediciones promediadas cada 10 minutos, y que tiene un período de recurrencia media de 50 años, a 30 metros de altura sobre el suelo. La velocidad está expresada en m/s.

VELOCIDAD EXTREMA ANUAL DE PROMEDIOS DE 3 SEGUNDOS

La velocidad de supervivencia de los aerogeneradores se define como la velocidad del viento promediada cada 3 segundos extrema anual, V_{e30} , que tiene un periodo de retorno medio de 50 años, o que tiene una probabilidad de ser excedida del 2 % en un año.

También se define otra velocidad de supervivencia como la velocidad del viento de promedios de 3 segundos extrema anual, V_{e1} , que corresponde a un nivel de confianza de 63,21 % (o que tiene una recurrencia media de 1 año).

Se establece la distribución de probabilidades. Los términos de promedios de intervalos de tiempo cortos son anotados como u_T , donde T es el tiempo de promediado. Se asume que u_T está normalmente distribuido alrededor del valor medio de 10 minutos U , con desviación estándar σ_T . La función de densidad de probabilidad condicional de u_T dado U es:

$$f(u_T | U) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u_T - U}{\sigma_T} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Se asume que la distribución de U sigue una función de Weibull. Según la teoría de probabilidades la función de densidad condicional $f(u_T, U)$ se tiene:

$$f(u_T, U) = f(u_T | U) f(U) \quad (9)$$

con la que se halla:

$$f(u_T) = \int_0^\infty f(u_T, U) dU = \int_0^\infty N[u_T; U, \sigma_T(U)] W[U; C; k] dU \quad (10)$$

donde $N[u_T; U, \sigma_T(U)]$ y $W[U; C, k]$ son respectivamente las notaciones de la distribución Normal y la distribución de Weibull, y σ_T es la parte de la desviación estándar total σ_u la cual permanece después de haber aplicado un filtro paso bajo con un periodo T .

La relación $q_T = \sigma_T / \sigma_u$ puede calcularse (Bergström, 1992) de:

$$q_T \approx \int_{f_0}^{0.5/T} S_{uu}(f) df / \int_{f_0}^\infty S_{uu}(f) df \quad (11)$$

El límite inferior de la integral f_0 puede escogerse aproximadamente $1/(2 \cdot 3600)$ Hz, para eliminar la componente sinóptica del espectro (EWTS II, 1998). La desviación estándar, σ_u , es una variable al azar y se puede estimar como:

$$\sigma_u = U / (\ln z/z_0) \quad (12)$$

o la expresión dada por la norma IEC 1400-1:

$$\sigma_u = 1,2 I_{med} (0,75 U + 0,16 V_{med}) \quad (13)$$

donde I_{med} es la intensidad de turbulencia media anual. Usando (10) y (13), se calcula la $f(u_T)$ de la velocidad del viento promediada cada 3 segundos para turbinas eólicas.

La función de la distribución acumulada (Fda) de u_T esta dada por:

$$F(u_T) = \int_{-\infty}^{u_T} \int_0^\infty N[u_T; U, \sigma_T(U)] W[U; C; k] dU du_T \quad (14)$$

Asumiendo n observaciones independientes, la distribución del valor extremo está dada por la distribución del estadístico de orden enésimo:

$$F_{X_{n:n}}(u_T) = F^n(u_T) \quad (15)$$

El cálculo de $F(u_T)$ consume mucho tiempo. Una alternativa, mucho más rápida, aprovecha el hecho de que dos fda con la misma cola derecha, los mismos valores para el rango (0,9; 1), y valores muy diferentes en el intervalo (0; 0,9) tienen exactamente la misma distribución límite (máximo) (Castillo, 1988: Capítulo 4.5).

Como la $f(u_T)$ se parece a una función de distribución de Weibull, entonces se puede ajustar una distribución de Weibull a la cola derecha de $f(u_T)$. Los parámetros c y k de Weibull pueden ser usados para obtener el valor extremo de la distribución,

para cualquier solución de x . Se obtiene un buen resultado con el cálculo exacto (15) si la cola derecha se toma en el rango (0,9; 1).

En la norma EWTS II se propone calcular las velocidades extremas de promedios de 3 seg a través del uso de gráficos en los que la velocidad extrema se extrae utilizando la velocidad media y el factor de forma de Weibull.

En las normas IEC 1400-1 las velocidades del viento, promediadas cada 3 segundos, extremas anuales, que tienen periodos de retorno de 50 años y 1 año, se calculan como:

$$V_{e50} = 1,4 V_{ref} \quad (16)$$

$$V_{e1} = 0,75 V_{e50} \quad (17)$$

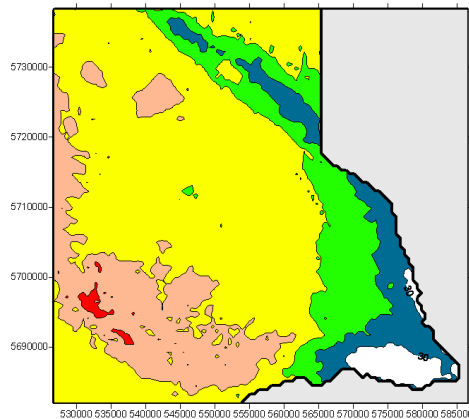


Figura 5: Distribución de la velocidad extrema anual de promedios de 3 seg a 30 m de altura que tiene un periodo medio de retorno de 50 años.

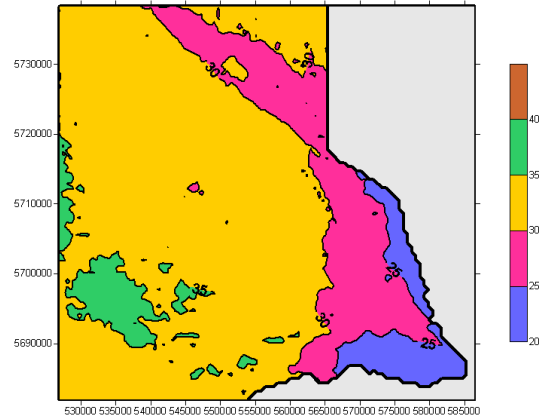


Figura 6: Distribución de la extrema del viento de promedios de 3 seg a 30 m de altura que tiene un periodo medio de retorno de 1 año.

En la Figura 5 se observa la velocidad V_{e50} calculada según la fórmula (16). El rango de velocidad está entre 27,8 m/s en las zonas más reparadas y 52,7 m/s en las más expuestas. El área del canal de riego presenta velocidades extremas entre 40 y 45 m/s, que son ligeramente inferiores a los propuestos en el nuevo código de edificación argentino, normas CIRSOC 102-2005, para esta zona de la Patagonia que están entre 46 y 48 m/s.

En la Figura 6 la V_{e1} fue estimada con la (17). El rango de velocidades está entre 20,9 m/s y 39,5 m/s. El área del canal presenta velocidades extremas entre 30 y 36 m/s y en este caso los valores concuerdan con los propuestos en las normas argentinas CIRSOC 102-2005 que da valores de velocidad extrema entre 30 a 32,5 m/s.

CONCLUSIONES

Se han calculado las velocidades extremas del viento con metodologías propuestas en normas internacionales que establecen los parámetros a calcular en el estudio de sitios con potencial para instalar parques eólicos.

Se han generado los mapas de: la velocidad extrema, de promedios de 10 minutos, que tiene una probabilidad de ser superada en un año del 2 %, es decir, periodo de retorno de 50 años (V_{ref}); de la velocidad extrema, de promedios de 3 segundos, con un periodo de recurrencia de 50 años (V_{e50}); y por último, de la velocidad extrema, de promedios de 3 segundos, con un periodo de recurrencia de 1 año (V_{e1}).

En el área donde está la traza del canal de riego podrían instalarse turbinas eólicas tipo IV puesto que la velocidad de referencia no supera 30 m/s y a pocos kilómetros de allí turbinas tipo III porque estas velocidades extremas son inferiores a 37,5 m/s, según la clasificación de aerogeneradores propuestos en las normas IEC 1400-1.

Los resultados obtenidos permiten conocer en detalle la distribución en el área del desarrollo agro-forestal las velocidades extremas puesto que la resolución espacial en ambas direcciones horizontales es de 178 metros.

Los valores calculados en este trabajo concuerdan razonablemente bien con los propuestos en las normas argentinas de edificación.

REFERENCIAS

Bergström, H. (1992). Distribution of Extreme Wind Speed. Wind Energy Report WE 92:2, Uppsala University, Department

- of Meteorology, Uppsala, Sweden.
- Castillo, E.; Extreme Value Theory in Engineering. Academic Press, Inc., 1988.
- Centro de Investigaciones de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles -CIRSOC (2005). Reglamento CIRSOC 102: Acción del Viento sobre las Construcciones, Argentina.
- Cook, N.J. (1982). Towards better estimation of extreme winds", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 9, 295-323.
- European Wind Turbine Standards II -EWTS II (1998). Published by ECN Solar & Wind Energy, Petten, The Netherlands.
- Harris, R.I. (1996). Gumbel revisited: a new look at extreme value statistics applied to wind speeds. J.; Wind Eng. Ind. Aerodyn., 59(1):1-22.
- International Electrotechnical Commission –IEC (1994). International Standard IEC 1400-1; Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements, first edition.
- Mattio, H.F., (2003). Nociones generales de energía eólica. Libro en formato digital, C.R.E.E., 214 pág.
- Palese, C. (2009). Campo de viento en el Centro-Este de la Provincia del Neuquén. Tesis Magister de la Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

ABSTRACT: The objective of this work is to calculate the field of extreme winds in the zone of Confluence in the province of the Neuquén. The methods of calculation, proposed in international standards, are based on the Gumbel distribution fit to the extreme winds and the Weibull distribution fit to the climatic winds. The maps of the reference wind speed (V_{ref}) and of the survival wind speed of wind turbines (V_{e50} and V_{e1}) have been generated. The maps have a spatial resolution in both horizontal directions of 178 meters. In the area, wind turbines type IV and type III would be able to be installed. The values calculated in this work agree with the proposed in argentinean standard.

Keywords: wind power, extreme winds, reference wind speed, survival velocity of the wind turbines, extreme 10-minutes average wind speed, extreme 3-seconds average wind speed.